

# Badania eksperymentalne silnika spalinowego zasilanego paliwem płynnym typu diesel wzbogaconym wodorem

Experimental research of a piston combustion engine fuelled by diesel enriched in hydrogen

DANIEL STĘPNIAK  
JAN SURWIŁO  
PIOTR LAMPART  
BOGUSŁAW SKARPETOWSKI \*

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.  
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.193

W niniejszym artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki badań dotyczących eksperymentalnego wzbogacania i spalania paliw ciekłych typu diesel w silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym KIPOR KM178F, który został zamontowany w agregacie prądowtłoczącym KIPOR KDE3500E. W pracy zwrócono uwagę na zmienność parametrów spalin silnika pracującego w trybie biegu jałowego oraz pod obciążeniem zasilanego paliwem ciekłym i wzbogaconym wodorem o różnych udziałach objętościowych, względem objętości całkowitej cylindra silnika. Przeprowadzono dokładną analizę jakościową i ilościową spalin przy wykorzystaniu specjalistycznego sprzętu pomiarowego. Określony został charakter zmian składu spalin, w tym cząstek CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, w zależności od obciążenia silnika zasilanego różnymi paliwami. **SŁOWA KLUCZOWE:** silniki tłokowe, wzbogacanie paliw ciekłych typu diesel, emisja CO i CO<sub>2</sub>, emisja NO<sub>x</sub>

*This paper presents the methodology and results of research focused on experimental investigation of enrichment and combustion of liquid fuels in a KIPOR KM178F CI engine mounted in the electric generator KIPOR KDE3500E. The study highlighted the variability of exhaust gases parameters produced by engine running in an idle mode and in a generation mode. Liquid diesel fuel and liquid diesel fuel enriched with hydrogen were used to supply the engine. Various volumetric proportions of hydrogen were calculated. Qualitative and quantitative analysis of exhaust gases was carried out by using specialized measuring equipment. The composition of the exhaust gases, including particulate CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, depending on the load of working engine powered by different fuels was defined.*

**KEYWORDS:** piston combustion engine, fuels enriching, CO and CO<sub>2</sub> emission, NO<sub>x</sub> emission

Regulacje w zakresie dozwolonych limitów emisji szkodliwych substancji, takich jak tlenki azotu (NO<sub>x</sub>), cząsteczki stałe (PM), węglowodór (HC) oraz tlenki węgla (CO), występujących w większości pojazdów mechanicznych sprzedawanych na terenie UE, są nakładane przez Unię Europejską normami EURO. Zakres regulacji obejmuje samochody osobowe i ciężarowe, autobusy, pociągi, traktory, maszyn rolnicze oraz statki rzeczne. Zgodnie z obowiązującymi od 1 października 2008 r. przepisami silniki diesla są objęte normą EURO 5, która wymusza znaczące obniżenie emisji szkodliwych tlenków typu NO<sub>x</sub> o 60%. Dalsze ograniczenia wymuszające zmniejszenie ilości tlenków azotu i cząstek stałych, odpowiednio o 50% i 80% w porównaniu do wcześniejszych limitów, w maszynach fabrycznie nowych typu ciągniki i ma-

szyny rolnicze o mocy silnika w zakresie 175-760 KM zostały określone przez przepisy z 2011 r. Dla uzyskania homologacji te pojazdy muszą spełniać wytyczne EURO IIIb. Od początku 2014 r. obowiązuje norma EURO 6, ustanowiona już w 2008 r. przez Parlament Europejski, która ogranicza emisję NO<sub>x</sub> o kolejne 80% [1].

**TABLICA I.** Dopuszczalne wartości emisji spalin w poszczególnych normach EURO dla pojazdów z silnikiem wysokoprężnym [1, 2]

g/km	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6
CO	3,16	1	0,64	0,5	0,5	0,5
HC	–	0,15	0,06	0,05	0,05	0,05
NO <sub>x</sub>	–	0,55	0,5	0,25	0,18	0,08
PM	0,14	0,08	0,05	0,009	0,005	0,005

Tendencja do ograniczania emisji szkodliwych produktów spalania wymusza na producentach jednostek silnikowych wyposażanie jednostek trakcyjnych w dodatkowe urządzenia. Jednym z rozwiązań jest technologia selektywnej redukcji katalizacyjnej (SCR) wykorzystująca wodny roztwór mocznika. Czynniki magazynowane w oddzielnym zbiorniku jest wtryskiwany do układu wydechowego pojazdu. Następnie w katalizatorze SCR mocznik reaguje chemicznie i przekształca szkodliwe gazy w nieszkodliwy azot oraz parę wodną [3]. Kolejnym rozwiązaniem mającym na celu utrzymanie emisji szkodliwych substancji na niskim poziomie jest montaż filtrów DPF (*Diesel Particulate Filter*) w układach wydechowych samochodów. Ich stosowanie wpływa na obniżenie emisji sadzy nawet o 80% [4].

W celu określenia czystości spalin konieczny jest regularny monitoring poziomu NO<sub>x</sub> w spalinach. Ilość tych cząstek świadczy o czystości spalin i prawidłowym przebiegu reakcji spalania w cylindrze. Oszacowanie zawartości CO jest również kluczowe ze względu na spełnienie norm czystości spalin. Z tego powodu dodatkowa kontrola parametrów, takich jak: O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, nadmiar powietrza ( $\lambda$ ), temperatura spalin i powietrza związanych z procesem spalania – jest uzasadniona.

## Stanowisko badawcze

Przedmiot badań stanowił jednostkowy, wolnossący silnik o zapłonie samoczynnym agregatu prądowtłoczącego KIPOR KDE3500E [5]. Jednostka prądowtłocząca stanowiąca samodzielne urządzenie prądowtłoczące wyposażona jest w generator prądu elektrycznego o mocy nominalnej/maksymalnej odpowiednio 2,8 kVA i 3,2 kVA. Do zasilania jednostki i równoczesnego wzbogacania wodorem paliwa typu diesel wykorzystano aparaturę stacji mieszania gazów, takich jak: metan, wodór, tlenek węgla, dwutlenek węgla oraz azot. Na drodze dozowania substratów w odpowiednich proporcjach

\* Mgr inż. Daniel Stępniaak (dstepniak@imp.gda.pl); mgr inż. Jan Surwiłło (j.surwilo@imp.gda.pl); dr hab. inż. Piotr Lampart prof. IMP PAN, (lampart@imp.gda.pl) – Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Energetyki Ciepłej, Zakład Turbin; mgr inż. Bogusław Skarpetowski (gascarsc@vp.pl) – Gascar-automotive

umożliwia ona wytwarzanie mieszanek paliwowych o zmiennej wartości opałowej oraz o natężeniu przepływu zależnym od obciążenia [6, 7].

Dawkowanie wodoru odbywało się przy użyciu elektrozaaworu, którego otwarcie kontrolowane było z wykorzystaniem aparatury sterująco-monitorującej. Dysza elektrozaworu połączona została, za pośrednictwem przewodu elastycznego, z dyszą kierunkową osadzoną w obudowie filtra powietrza. Wodór w stanie lotnym do komory spalania doprowadzany wraz z powietrzem kanałem dolotowym. Wtrysk wodoru odbywał się pod ciśnieniem nie większym niż  $p = 2$  bar i jego wymieszanie z powietrzem odbywało się na etapie zasysania powietrza.

Złożone elementy armatury o średnicy  $D = 1\frac{1}{4}$  cal i długości całkowitej  $L = 0,5$  m, wykonane ze stali, umiejscowione zostały tuż za tłumikiem, zapewniając umiejscowienie sondy pomiarowej przy równoczesnym zagwarantowaniu swobodnego wypływu strugi spalin.

Do pomiaru składu spalin w trakcie pracy silnika posłużono się analizatorem spalin Testo 330-2II [8]. Przyrząd umieszczony w strudze spalin umożliwił monitorowanie wybranych parametrów w sposób ciągły.

### Metodyka wykonywanych badań eksperymentalnych

Przeprowadzone badania eksperymentalne umożliwiły zestawienie wyników pomiarów uzyskanych podczas zasilania silnika paliwem ciekłym oraz wyników pomiarów uzyskanych podczas zasilania jednostki paliwami ciekłymi wzbogaconymi wodorem o różnych udziałach objętościowych względem objętości całkowitej cylindra silnika.

W celu określenia procentowego udziału wodoru względem objętości cylindra silnika dokonano stosownych obliczeń według wzorów:

$$Q_{pow} = (V \cdot RPM \cdot k) / 2$$

$$Q_{wodoru} = a \cdot Q_{pow}$$

gdzie:  $V$  – objętość cylindra [ $m^3$ ],  $RPM$  – prędkość obrotowa [obr/min],  $k$  – współczynnik wypełnienia,  $Q_{pow}$  – przepływ całkowity powietrza w czasie pojedynczego cyklu pracy silnika [ $m^3/min$ ],  $Q_{wodoru}$  – przepływ całkowity wodoru w czasie pojedynczego cyklu pracy silnika [ $m^3/min$ ].

W części eksperymentalnej badań posłużono się mieszaninami paliwowymi składającymi się w różnych proporcjach z paliwa ciekłego typu diesel oraz wodoru doprowadzanego wraz z powietrzem. Badania podzielono na kilka serii pomiarowych, w zależności od procentowego udziału wodoru: 0%, 1%, 2%, 2,5% oraz 3%. Dla każdej serii pomiarowej jednostkę prądotwórczą badano w trakcie działania na biegu jałowym oraz w trybie pracy pod obciążeniem odpowiednio o mocy: 0,5 kW, 1 kW, 1,5 kW. Podczas zasilania agregatu paliwem ciekłym lub mieszaniną paliw wykorzystano obciążenie w postaci nagrzewnicy o charakterze rezystancyjnym oraz oświetlenia. Pomiaru poszczególnych wskaźników odzwierciedlających jakość spalin dokonywane były w odstępach czasu nie krótszych niż  $t = 4$  min od momentu zmiany obciążenia oraz rodzaju paliwa. Spełnienie tego warunku było konieczne z uwagi na bezwładność przy stabilizacji parametrów, jaką można zaobserwować w trakcie regulacji maszyn silnikowych.

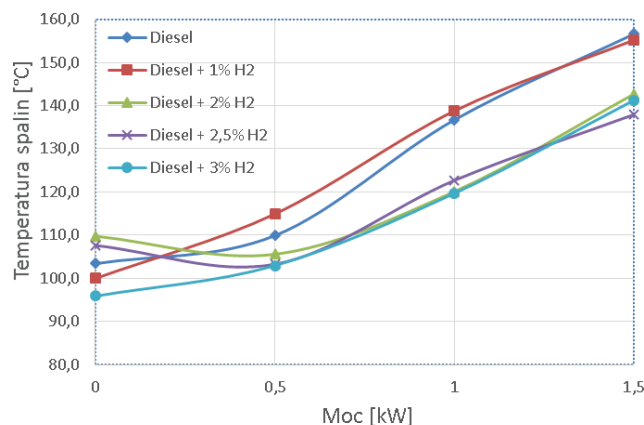
### Wyniki i ocena rezultatów badań

Charakter zmian temperatury spalania nie jest jednoznaczny. Dostrzegalna jest tendencja przyrostu temperatury spalin

wraz z załączaniem dodatkowego obciążenia. Zwiększanie ilości dawkowanego wodoru powyżej 2% powodowało obniżenie temperatury spalin. Najwyższa temperatura spalin wyniosła  $t_{max} = 156,6^\circ C$  i została odnotowana przy pracy silnika zasilanego paliwem typu diesel pod obciążeniem  $P = 1,5$  kW. Maksymalne zaobserwowane różnice temperatury wyniosły  $\Delta t = -19,1^\circ C$  dla pracy silnika pod obciążeniem  $P = 1,5$  kW oraz zasilaniu paliwem diesel + 3% wodoru oraz  $\Delta t = -18,8^\circ C$  dla pracy silnika pod obciążeniem  $P = 1$  kW oraz zasilaniu paliwem diesel + 2,5% wodoru (rys. 1).

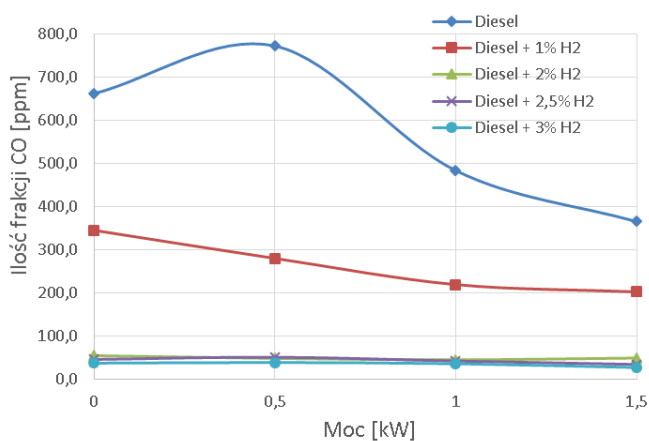
Na skutek dawkowania dodatkowej porcji wodoru do diesla znacząco obniżyła się emisja cząstek CO. Wraz ze zwiększaniem się udziału paliwa gazowego zmniejszał się udział tlenku węgla w spalinach. Najbardziej obiecujące wyniki pomiarów odczytane zostały podczas zasilania silnika mieszaninami o największej zawartości wodoru, a więc paliwami typu diesel + 2,5% wodoru oraz diesel + 3% wodoru. Maksymalny spadek emisji cząstek CO ustabilizował się na poziomie  $\Delta CO = 734,01$  ppm podczas zasilania silnika mieszaniną paliwową diesel + 3% wodoru i wyniósł 95% wartości wyjściowej równej  $CO = 772,6$  ppm (rys. 2). Równocześnie dawkowanie wodoru, który jest paliwem wysokokalorycznym, do strugi powietrza zasysanego w filtrze, powoduje obniżenie spalania oleju napędowego, co ma wpływ na zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Zmniejszenie dawki oleju napędowego spowodowane podawaniem wodoru skutkuje obniżeniem udziałów ilości pierwiastka węgla biorącego udział w spalaniu, co wpływa także na spadek emisyjności  $CO_2$  (rys. 3).

Dawkowanie wodoru do powietrza zasysanego w filtrze, w celu wzbogacenia paliwa typu diesel, powoduje obniżenie emisyjności  $NO_x$ . Maksymalny spadek frakcji typu  $NO_x$  został odnotowany dla trybu pracy pod obciążeniem 1 kW, przy zasilaniu jednostki paliwem diesel + 2% wodoru. Wyniósł on 61 ppm. Wartość ta stanowiła równocześnie 21% w odniesieniu do zawartości frakcji  $NO_x$  przy spalaniu bez dawkowania dodatkowego paliwa gazowego typu wodór (rys. 4 i tabl. II).

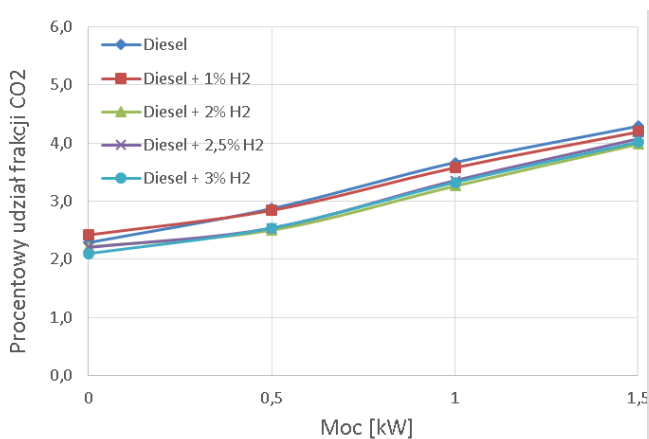


Rys. 1. Temperatura spalin dla różnych warunków pracy silnika

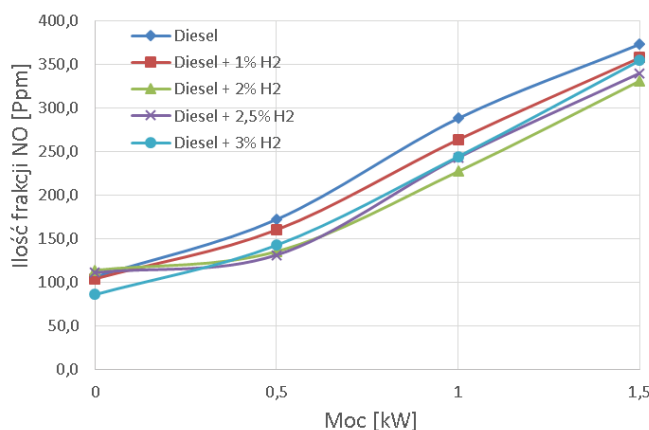
Wodór wtryskiwany do przestrzeni obudowy filtra był dokładnie wymieszany z powietrzem, niemniej jednak lokalizacja dyszy kierunkowej oraz charakter pracy silników tłokowych nie mogą gwarantować utrzymania stałych wartości ciśnienia oraz niezmiennego składu mieszaniny gazów wodór + powietrze w miejscu, w którym trafiają one do przestrzeni komory spalania silnika. Na biegu jałowym silnik pracował niestabilnie, zaobserwowano chwilowe zmiany prędkości obrotowej. Pod obciążeniem praca silnika stabilizowała się ze względu na większą inercję układu. Dawkowanie wodoru powinno się odbywać z wykorzystaniem zbiornika mieszalnikowo-buforowego w celu uzyskania bardziej jednolitej mieszaniny. Co



Rys. 2. Procentowy udział frakcji CO w spalinach dla różnych warunków pracy silnika



Rys. 3. Zawartość frakcji CO<sub>2</sub> w spalinach dla różnych warunków pracy silnika



Rys. 4. Zawartość frakcji NO w spalinach dla różnych warunków pracy silnika

za tym idzie, niezbędne jest dobranie precyzyjnego układu automatyki regulującego dawkę wodoru w funkcji ilości powietrza przepływającego przez silnik. Ma to znaczenie głównie w silnikach trakcyjnych, w których prędkość obrotowa jest zmienna. W efekcie zmienna jest również ilość przepływającego powietrza, przypadająca na pojedynczy cykl pracy.

Przyrost zawartości tlenu w stosunku do ilości paliwa w mieszaninie paliwowo-powietrznej  $\lambda$  skutkuje wydajniejszym dopalaniem frakcji CO, stanowiących półprodukt spalania. Zbyt duża dawka wodoru w stosunku do ilości powietrza zasilającego powoduje wzrost ilości NO<sub>x</sub>. Dozowana dawka wodoru powinna być dobrana precyzyjnie do danego silnika w celu uzyskania jak najniższej emisyjności.

TABLICA II. Zestawienie wartości mierzonych parametrów pracy silnika zasilanego różnymi mieszaninami paliwowymi

	Moc [kW]	Temperatura spalin [°C]	% CO <sub>2</sub>	CO [ppm]	NO [ppm]	$\lambda$ [-]
Diesel	0	103,39	2,29	662,06	105,74	6,74
	0,5	109,89	2,87	772,60	171,88	5,36
	1	136,70	3,67	483,67	287,80	4,21
	1,5	156,59	4,29	365,46	372,95	3,59
Diesel + 1% H <sub>2</sub>	Bieg jałowy	99,97	2,42	345,21	103,75	6,36
	0,5	114,90	2,84	280,16	159,89	5,42
	1	138,76	3,58	219,38	263,41	4,31
	1,5	155,19	4,19	202,50	357,38	3,67
Diesel + 2% H <sub>2</sub>	Bieg jałowy	109,76	2,22	54,54	113,50	7,06
	0,5	105,56	2,50	48,21	135,09	6,16
	1	120,09	3,26	44,89	226,86	4,74
	1,5	142,66	3,98	49,03	330,80	3,87
Diesel + 2,5% H <sub>2</sub>	Bieg jałowy	107,60	2,20	45,67	110,84	7,10
	0,5	103,25	2,54	50,92	131,01	6,08
	1	122,67	3,36	42,05	242,76	4,60
	1,5	137,92	4,07	34,16	339,73	3,79
Diesel + 3% H <sub>2</sub>	Bieg jałowy	95,86	2,10	37,18	85,59	7,38
	0,5	102,94	2,54	38,59	142,28	6,08
	1	119,68	3,32	35,85	243,90	4,65
	1,5	141,23	4,02	26,90	354,21	3,84

Wodór nie należy do grupy paliw składających się z długich łańcuchów węglowodorowych. Struktura budowy pojedynczych cząsteczek wodoru przyczynia się do przyspieszenia i stabilizacji procesu spalania, co powoduje spadek temperatury w cylindrach i temperatury spalin. Wpływa to pozytywnie na eksploatację i żywotność silnika spalinowego pod warunkiem, że proces ten jest odpowiednio kontrolowany.

## Podsumowanie

Dawkowanie dodatkowej porcji wodoru do paliwa ciekłego diesel w znacznym stopniu przyczynia się do obniżenia emisji cząstek CO. Największy spadek emisji cząstek CO zaobserwowano podczas zasilania silnika mieszanką paliwową diesel + 3% wodoru i wynosił on 5% wartości wyjściowej równej CO = 772,6 ppm.

Wzbogacanie wodorem korzystnie wpływa na emisję cząstek CO<sub>2</sub> oraz NO<sub>x</sub>. Obniżenie emisji NO<sub>x</sub> wyniosło maksymalnie 21% przy zasilaniu jednostki silnikowej paliwem diesel + 2% wodoru względem zawartości frakcji NO<sub>x</sub> przy spalaniu bez dawkowania dodatkowego paliwa gazowego typu wodór.

Wodór, który jest paliwem wysokokalorycznym, ze względu na charakter budowy i skład chemiczny powoduje przyspieszenie reakcji chemicznych zachodzących w trakcie spalania. Jego dawkowanie powoduje obniżenie temperatury spalin.

## LITERATURA

1. Normy i technologia SCR [Online], [dostęp: 19.03.2016].
2. www.strychalski.eu [dostęp: 21.03.2016].
3. www.greenchem-adblue.pl [dostęp: 21.03.2016].
4. www.theaa.com [dostęp: 21.03.2016].
5. www.kipor.com [dostęp: 19.03.2016].
6. Stępiak D., Surwiło J. „Analiza wskaźników energetycznych i emisyjnych podczas pracy silnika tłokowego zasilanego mieszaniną syngazową”. Opracowania wew. IMP PAN, Gdańsk 2015, s. 41.
7. Stępiak D., Surwiło J. „Badania eksperymentalne spalania mieszanki syngazowej w silniku tłokowym.” Opracowania wew. IMP PAN, Gdańsk 2015, s. 32.
8. www.testo.com.pl [dostęp: 19.03.2016].